

Государственный комитет Российской Федерации
по высшему образованию

Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина

На правах рукописи

Попов Евгений Александрович

Квантовые интерференционные эффекты в ядерном резонансном рассеянии
гамма-излучения

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Казань – 2004

Работа выполнена в Казанском государственном энергетическом университете

Научные консультанты: доктор физико-математических наук,
профессор Башкиров Шамиль Шагивалеевич
доктор физико-математических наук,
профессор Самарцев Виталий Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Любутин Игорь Савельевич.
доктор физико-математических наук,
профессор Садыков Эдгар Камилович.
доктор физико-математических наук,
профессор Семёнов Валентин Георгиевич

Ведущая организация: РНЦ «Курчатовский институт»
г. Москва

Защита состоится «_26_» __февраля____ 2004 г. в _14³⁰_ часов на заседании Диссертационного совета Д 212.081.15 в Казанском государственном университете им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г.Казань, ул. Кремлевская, д. 18, КГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке КГУ.

Автореферат разослан «_26_» __января____ 2004 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Еремин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена теоретическому исследованию квантовых интерференционных эффектов, которые возникают под действием внутренних и внешних возмущений, в ядерном резонансном рассеянии гамма-излучения в твёрдом теле: магнетике, парамагнетике, диамагнетике.

Актуальность темы

Квантовые интерференционные эффекты в ядерном резонансном рассеянии гамма-излучения играют важную роль в исследованиях атомной структуры и атомной динамики в конденсированных средах. Они включают эффекты пространственной когерентности в рассеянии вперёд и брэгговском рассеянии гамма-кванта в резонансной среде с линейными размерами гораздо меньшими длины когерентности этого кванта, а также эффекты временной фазовой когерентности и интерференции поляризационных состояний гамма-кванта при взаимодействии с отдельными мёссбауэровскими атомами, имеющими многоуровневую структуру электронно-ядерных состояний. Последние формируют картину квантовых биений резонансного отклика «гамма-оптической» среды, с помощью которой можно получить ценную информацию о локальном окружении мёссбауэровского иона через механизмы сверхтонкого магнитного и квадрупольного взаимодействий, а также о динамических процессах, имеющих микроскопическую природу, таких как электронные спиновые флуктуации в парамагнетиках, суперпарамагнетизм, диффузия атомов в твёрдом теле, электронный обмен и зарядовые флуктуации.

Ядерное резонансное рассеяние гамма-излучения может испытывать влияние внешних когерентных возмущений, таких как резонансное радиочастотное поле [1], «быстрое» (по сравнению с периодом ларморовской прецессии ядерного углового момента) перемагничивание магнитной среды [2], «быстрые» (по сравнению со временем жизни ядра в возбужденном состоянии) движения источника гамма-излучения и образца [3], ультразвук [4]. Перечисленные внешние возмущения вызывают Мёссбауэр – ЯМР двойной резонанс, изменение ядерного резонансного поглощения магнитной среды под действием импульсных воздействий, эхоподобные эффекты и т.д.. Интерференционные эффекты, индуцируемые резонансным радиочастотным (РЧ) полем, могут играть существенную роль в схемах усиления гамма-излучения без инверсии [4]. В этом случае временная фазовая когерентность в системе двух подуровней основного состояния ядра может привести к резкому уменьшению ядерного резонансного поглощения и, следовательно, сделать более благоприятными условия для вынужденной гамма-эмиссии с подуровня возбужденного состояния ядра.

Применение синхротронного излучения (СИ) для возбуждения ядерных переходов позволяет наблюдать резонансный отклик (РО) «гамма-оптической» среды во временной области. В его формировании значительную роль играют эффекты пространственной когерентности (ускорение спада сигнала РО) и многократного рассеяния гамма-кванта (динамические биения сигнала РО). Эти эффекты связаны с размерами ядерного ансамбля, участвующего во взаимодействии с отдельным квантом. Интенсивность и форма сигнала РО должны зависеть не только от размеров ядерного ансамбля, но и от формы импульса падающего излучения. Амплитудно-фазовые соотношения в электромагнитном поле импульса могут повлиять на интерференцию индивидуальных ядерных возбуждений и, следовательно, оказать значительное влияние на характер ядерного резонансного рассеяния гамма-излучения в среде, тем самым существенно трансформируя сигнал РО.

Когерентные эффекты в ядерном резонансном рассеянии СИ должны играть важную роль и при «мгновенном» изменении макроскопического состояния магнитной среды. В этом случае они определяются фазовыми соотношениями в волновых функциях смешанных подуровней, между которыми будут происходить ядерные переходы. Воздействие внешнего радиочастотного поля на процесс резонансного взаимодействия синхротронного излучения с ансамблем мёссбауэровских ядер в магнитной среде открывает уникальную возможность исследовать во временной области характер квантования ядерного углового момента в периодическом сверхтонком поле, что будет существенным дополнением исследований, проводимых в частотном диапазоне с естественным радиоактивным источником гамма-квантов[5].

Эффекты квантовой интерференции в ядерном резонансном рассеянии гамма-кванта в неоднородной магнитной среде, стимулированные внешними радиочастотными и «импульсными» возмущениями, могут стать полезным инструментом для изучения распределения локальных СТ полей в образце. В частотной области таковыми могут быть эффекты интерференции поляризационных состояний гамма-кванта, стимулированные радиочастотным возмущением, тогда как во временной области – эффекты временной фазовой когерентности, стимулированные «импульсным» возмущением при использовании импульса СИ для перевода ядер в возбужденное состояние.

Известно, что спин-спиновые и спин-решеточные взаимодействия, вызывающие спиновые флуктуации в электронной оболочке мёссбауэровского иона, является традиционным предметом исследований гамма-резонансной спектроскопии. Они могут быть эффективно дополнены соответствующими исследованиями во временной области с использованием импульса СИ в качестве падающего излучения. Электронные спиновые флуктуации (ЭСФ) приводят к потере временной фазовой когерентности в ансамбле индивидуальных ядерных воз-

буждений, что является причиной изменения формы резонансного отклика «гамма-оптической» парамагнитной среды. Выполненные эксперименты описаны только в пределах малых и больших частот ЭСФ (скоростей электронной релаксации (ЭР)). Для проведения анализа в общем случае требуется развитие новых теоретических подходов.

Синхротронное излучение можно сделать монохроматическим, так что его частотное распределение будет приближаться к частотному распределению гамма-излучения естественного радиоактивного источника [6]. Уникальные свойства получаемого монохроматического излучения, а именно высокая направленность и почти 100 % поляризация, делают его весьма привлекательным для исследований когерентных эффектов в схемах усиления без инверсии с целью реализации условий вынужденной гамма-эмиссии. Эффективность возможных экспериментов значительно повысится, если будут известны общие закономерности, которые можно получить в ходе теоретического изучения таких эффектов в модельных системах ядерных уровней.

Таким образом, под действием внутренних и внешних возмущений в ядерном резонансном рассеянии гамма-излучения возникает ряд эффектов квантовой интерференции различной природы, которые требуют теоретического изучения. Это может дать стимул для развития соответствующих экспериментальных исследований, чья эффективность будет расти в связи с дальнейшим совершенствованием источников синхротронного излучения.

Цель работы состояла в разработке теоретических методов исследования квантовых интерференционных эффектов в ядерном резонансном рассеянии гамма-излучения в конденсированных средах, в присутствии внутренних и внешних возмущений, а также за счет формы падающего гамма-импульса, в том числе:

- в развитии теоретических методов изучения интерференционных эффектов, обусловленных формой импульса падающего излучения
- в теоретическом исследовании эффектов временной фазовой когерентности, обусловленных неадиабатическими изменениями макроскопических свойств магнитной среды;
- в разработке теоретических подходов для анализа эффектов временной фазовой когерентности, индуцированных осциллирующим и вращающимся радиочастотными полями;
- в построении теоретических моделей исследования распределения локальных сверхтонких полей в неоднородной магнитной среде, на основе эффектов интерференции поляризационных состояний гамма-кванта, индуцированных радиочастотными возмущениями, и эффектов временной фазовой когерентности, индуцированных «мгновенными» возмущениями;

- в создании теоретических методов изучения влияния стохастических процессов в электронной оболочке мёссбауэровского иона на процесс ядерного резонансного рассеяния синхротронного излучения в парамагнитной среде;

- в развитии теоретических методов изучения режимов вынужденной генерации гамма-излучения и индуцированной прозрачности в «гамма-оптических» средах на основе интерференционных эффектов, порождаемых слабыми радиочастотными полями.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- впервые теоретически изучен эффект гамма-эхо в ядерном резонансном рассеянии синхротронного излучения в неоднородной магнитной среде. Построен теоретический формализм, позволяющий проводить описание гамма-эхо как в геометрии рассеяния вперед, так и в геометрии малоуглового рассеяния;

- рассмотрены физические особенности ядерного резонансного рассеяния гамма-излучения в спектрально неоднородной среде под действием внешнего радиочастотного поля в режиме Мёссбауэр-ЯМР двойного резонанса. Установлено, что «РЧ сканирование» неоднородно уширенных линий мёссбауэровского спектра поглощения позволит получить информацию о распределении локальных сверхтонких полей непосредственно из эксперимента;

- изучено влияние формы импульса падающего гамма-излучения на процесс ядерного резонансного рассеяния в двухуровневой среде в геометрии рассеяния вперед и в геометрии брэгговского рассеяния. Получены условия, при которых конструктивная интерференция приводит к усилению сигнала резонансного отклика, а деструктивная интерференция – к его ослаблению и значительному изменению формы. Проведено сравнение теоретических расчетов с экспериментальными результатами;

- развит теоретический подход для рассмотрения свойств ядерного резонансного рассеяния гамма-излучения в системе уровней в отсутствии инверсной заселенности под действием внешнего радиочастотного поля. Найдены условия для вынужденной генерации гамма-излучения в схемах с монохроматическим и бихроматическим РЧ полями;

- разработан теоретический формализм, позволяющий моделировать влияние электронных спиновых флуктуаций (ЭСФ) мёссбауэровского иона на ядерное резонансное рассеяние синхротронного излучения в парамагнитной среде. Найдены основные закономерности, которым подчиняется эволюция сигнала резонансного отклика при увеличении частот ЭСФ (скоростей электронной релаксации) и изменении заселённостей электронных подуровней;

- изучено влияние внешних когерентных возмущений ядерного резонансного рассеяния синхротронного излучения на изменение прозрачности магнитной среды с равновесной заселенностью уровней.

В диссертации сформулированы и обоснованы научные положения и выводы, совокупность которых можно представить как теоретические основы изучения квантовых интерференционных эффектов, в присутствии внутренних и внешних возмущений, в ядерном резонансном рассеянии гамма-излучения в конденсированных средах.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Новый подход для исследования квантовых интерференционных эффектов, при наличии внутренних и внешних возмущений, в ядерном резонансном рассеянии мёссбауэровского и синхротронного излучения в конденсированных средах (магнитных, диамагнитных, парамагнитных).

2. Теоретическое исследование эффекта гамма-эха в ядерном резонансном рассеянии синхротронного излучения за счет «мгновенного» 180° - поворота вектора намагниченности неоднородной магнитной среды. Построение теоретического формализма для описания гамма-эха в каналах рассеяния вперед и малоуглового рассеяния.

3. Результаты исследований эффектов интерференции поляризационных состояний гамма-кванта в спектрально- неоднородной среде при условиях Мёссбауэр-ЯМР двойного резонанса. Определение разброса локальных сверхтонких полей в образце при «радиочастотном сканировании» линий мёссбауэровского спектра поглощения.

4. Результаты изучения когерентных эффектов в ядерном резонансном рассеянии гамма-квантов, связанных с формой импульса падающего излучения. Получение условий, приводящих к усилению и ослаблению сигнала резонансного отклика двухуровневой «гамма-оптической» среды.

5. Изучение эффектов квантовой интерференции, приводящих к изменениям прозрачности многоуровневой «гамма-оптической» магнитной среды с равновесной заселенностью ядерных уровней. Существенное подавление резонансного взаимодействия падающего гамма-излучения с системой мёссбауэровских ядер под действием «импульсных» и радиочастотных возмущений.

6. Результаты исследования эффектов временной фазовой когерентности в ядерном резонансном рассеянии гамма-излучения и эффектов интерференции поляризационных состояний гамма-кванта в схемах усиления без инверсии с радиочастотным полем. Вывод условий для вынужденной генерации гамма-излучения в случаях монохроматического и бихроматического РЧ полей.

7. Изучение эффектов потери временной фазовой когерентности в ядерном резонансном рассеянии синхротронного излучения, обусловленных спиновыми флуктуациями в электронной оболочке мёссбауэровского иона. Общие закономерности, которым подчиняются сигналы резонансного отклика парамагнитной среды при изменении параметров стохастического процесса.

8. Теоретическое исследование эффектов квантования ядерного углового момента в переменном сверхтонком поле в ядерном резонансном рассеянии синхротронного излучения в каналах рассеяния вперед и пространственного некогерентного рассеяния. Способы формирования картины квантовых биений сигнала РО, определяемых квазиэнергетической структурой ядерных уровней.

Научная и практическая значимость

Полученные в диссертации результаты стимулируют развитие теоретических и экспериментальных методов исследований магнитных, структурных и «гамма-оптических» свойств конденсированных сред, а также эффектов атомной динамики в конденсированных средах в ядерном резонансном рассеянии гамма-излучения, и открывают перспективы для повышения эффективности источников синхротронного излучения.

Практически могут быть использованы:

- эффект гамма-эхо и радиочастотное сканирование линий мёссбауэровского спектра поглощения для изучения локального магнитного порядка в магнитных порошках и сплавах;
- условия вынужденной эмиссии в схемах усиления без инверсии с радиочастотным полем для экспериментальных исследований режимов вынужденной генерации в диамагнитных средах на основе мёссбауэровских изотопов ^{67}Zn и ^{181}Ta при сверхнизких температурах;
- зависимость картины квантовых биений резонансного отклика магнитной среды от фазы внешних радиочастотных возмущений для изучения магнито-акустических свойств антиферромагнетиков типа «легкая плоскость»;
- закономерности в эволюции сигнала резонансного отклика при увеличении частот спиновых флуктуаций электронной оболочки мёссбауэровского иона для экспериментального изучения спин-решёточных и спин-спиновых взаимодействий в парамагнетиках;
- метод изучения изменения коэффициента резонансного поглощения под действием «импульсных» возмущений процесса ядерного резонансного рассеяния синхротронного излучения для экспериментального изучения условий «гамма-оптического» просветления магнитной среды.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на:

Международной конференции по применению эффекта Мёссбауэра (Канада, Ванкувер, 1993); Международной конференции по фотонному эху и когерентной спектроскопии (Россия, Йошкар-Ола, 1997); Международных чтениях по квантовой оптике (Россия, Казань, 1999); Международной конференции «Эффект Мёссбауэра: магнетизм, материаловедение и гамма-оптика» (Россия, Казань, 2000); III-ей Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (Россия, Москва, 2001); Международной конференции «Эффект Мёссбауэра и его применение» (Россия, Санкт-Петербург, 2002); IV-ой Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (Россия, Москва, 2003)

Часть диссертационных материалов была выполнена в рамках проекта ISF-Российское правительство, № ЖК100, проекта РФФИ – INTAS № 95-0586; проектов РФФИ (№ 94-02-0584, №96-02-17667, №97-02-17363, №98-02-16601, № 00-02-16512), проекта №77 VI конкурса Комиссии РАН по работе с молодежью.

Публикации

Содержание диссертации опубликовано в 23 статьях, а также тезисах перечисленных выше конференций и совещаний (всего 30 печатных работ).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, изложения основных результатов и выводов и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 23 страниц, включая 43 рисунка, 3 таблицы и списка цитированной литературы из 199 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обосновывается актуальность выбранного направления, сформулирована цель работы. Выделены наиболее значительные результаты, приводятся основные положения, выносимые на защиту, а также обсуждается научная и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава носит обзорный характер. В ней вводятся основные понятия ядерного резонансного рассеяния синхротронного излучения. Проанализирован современный уровень изучения свойств конденсированных сред в данной области науки. Рассматриваются основные следствия влияния внешнего радиочастотного поля на резонансное взаимодействие мёссбауэровского излучения с

ядерной системой. Дан обзор и краткий анализ современных концепций в проблеме гамма-лазера, использующих эффект Мёссбауэра в твердом теле.

§1.1 Ядерное резонансное рассеяние синхротронного излучения (СИ) становится мощным методом исследования физики конденсированного состояния с помощью коротковолнового электромагнитного излучения, в рассматриваемом случае - рентгеновского излучения. В настоящее время синхротроны 3-го поколения, обладающие большей спектральной яркостью, чем предыдущие устройства, используются в качестве источников рентгеновского излучения с длиной волны $\leq 1\text{Å}$ для возбуждения низкоэнергетических ядерных уровней ($10\div 100\text{ кэВ}$) мёссбауэровских изотопов. В последнее время получили развитие идеи об испускании когерентного СИ пучками электронов в периодическом внешнем поле (принцип лазера на свободных электронах), что может привести к созданию лазеров в рентгеновском диапазоне. Предполагается, что яркость такого источника СИ по крайней мере на 6 порядков будет превышать яркость источников СИ 3-го поколения. Это позволит резко уменьшить время эксперимента и значительно расширить круг задач физики конденсированного состояния, решаемых методами гамма-резонансной спектроскопии. Общая теория ядерного резонансного рассеяния СИ в «гамма-оптической» среде произвольной толщины была разработана Афанасьевым и Каганом [7] и Хенноном и Треммелем [8]. В основе теории лежит идея формирования коллективного возбуждения при резонансном взаимодействии гамма-кванта с ансамблем ядер в образце. Такое возбуждение (ядерный экситон) является следствием делокализации резонансного гамма-кванта в образце с линейными размерами много меньшими длины когерентности этого кванта. Когда ядерный ансамбль «мгновенно» возбуждается импульсом СИ, то появляется возможность наблюдать распад свободной индукции ядерного экситона, приводящий к возникновению сигнала резонансного отклика «гамма-оптической» среды. Изучая временную форму сигнала РО, можно увидеть: ускорение распада ядерного экситона, обусловленное усилением радиационного канала ядерной реакции; возникновение динамических биений за счет многократного рассеяния гамма-кванта; возникновение квантовых биений, обусловленных сверхтонким магнитным и квадрупольным расщеплением ядерных уровней. Эти и другие когерентные эффекты, связанные с размерами ансамбля резонансных ядер, структурными особенностями и локальным магнитным порядком в образце, наблюдаются в упругих каналах рассеяния вперед, ядерной дифракции, полного внешнего отражения. Канал рассеяния вперед, так же как и каналы неупругого и квазиупругого рассеяния, является эффективным при изучении стохастических процессов в твердом теле, таких как суперпарамагнетизм, парамагнитная релаксация, диффузия атомов, колебания кристаллической решетки и т.д. Внешние когерентные возмущения ядерного резонансного рассеяния СИ, обусловленные ультразвуком,

радиочастотным полем, «мгновенными» изменениями положения образца и его макроскопического магнитного состояния, порождают специфические эффекты, которые изучались в каналах рассеяния вперед и ядерной дифракции.

§1.2 Изучение влияния резонансного радиочастотного поля на ядерное резонансное рассеяние гамма-квантов началось с работы Хака и Хамермеша (1960). Порождаемые эффекты имеют несколько разновидностей, одна из которых, Мёссбауэр-ЯМР двойной резонанс, рассматривается в дальнейшем. Различаются между собой эффекты, индуцируемые слабым РЧ полем при сверхнизких температурах и эффекты, вызванные переменной составляющей сверхтонкого поля H_{pc} , которая сравнима по величине с самим СТ полем H_{cm} . В первом случае происходит перезаселение подуровней основного состояния ядра за счет ЯМР переходов, ведущее к изменению весовых коэффициентов линий мёссбауэровского спектра поглощения, либо появление новых линий в мёссбауэровском спектре пространственного некогерентного рассеяния. Во втором случае, когда подуровни основного состояния ядра равнозаселены, действие H_{pc} , резонансного, например, для возбужденного состояния ядра, приводит к расщеплению линий мёссбауэровского спектра поглощения на $2I_e + 1$ составляющих (Габриэль, 1969). Это связано с особенностями квантования углового момента возбужденного состояния ядра I_e в переменном магнитном поле, приводящими к возникновению уровней квазиэнергии. Индикатором уровней квазиэнергии во временной области является модуляция квантовых биений сигнала резонансного отклика осцилляциями Раби (Швыдыко, 1995). Интерференционные эффекты порождаемые слабым РЧ полем при условиях Мёссбауэр-ЯМР двойного резонанса, меняют характер резонансного поглощения гамма-кванта заданной частоты (Коуссесмент и др. 1993) и могут использоваться в поисковых исследованиях по проблеме гамма-лазера.

§1.3 Анализируется реальность концепций гамма-лазера, которые должны удовлетворять следующим условиям: а) накачка не должна разрушать условия для вынужденной генерации гамма-излучения без отдачи (или условия эффекта Боррманна, если он является особенностью проекта); б) кристаллическая матрица и ядерный изотоп должны образовать совместимую систему; в) должен быть учтен кинетический аспект при определении мощности накачки; г) должны быть рассмотрены особенности, связанные с принципом неопределенности. Большинство заслуживающих внимание проектов являются двухшаговыми. Первый шаг – ядерная реакция генерирует долгоживущий ядерный изотоп, который разделяется и концентрируется физико-химическими методами, а затем внедряется в твердотельную матрицу; второй шаг – накачка переводит долгоживущий ядерный изотоп на верхний рабочий уровень и инициирует вынуж-

денную генерацию гамма-излучения. Проекты с нейтронной накачкой являются в основном одношаговыми.

Другую группу концепций гамма-лазера образуют те, в которых не требуется выполнение условия инверсии заселенности ядерных уровней. К таким относятся проекты, в которых предполагается использовать эффект отдачи, с тем чтобы исключить резонансное поглощение и привести к условиям вынужденной генерации гамма-излучения. В других проектах гамма-лазера без инверсии заселенности ядерных уровней вынужденная эмиссия гамма-излучения без резонансного поглощения происходит за счет связи двух близких или вырожденных нижних подуровней посредством лазерного или радиочастотного поля. В проектах третьего типа ядерная система, находящаяся при сверхнизких температурах на самом низколежащем СТ подуровне основного состояния частично переводится поляризованной накачкой на СТ подуровень возбужденного состояния, которое является инверсно заселенным по отношению к пустому, высоколежащему СТ подуровню основного состояния.

Во второй главе рассматриваются два типа эффектов квантовой интерференции в ядерном резонансном рассеянии гамма-излучения: 1) эффекты, связанные с амплитудно-фазовой структурой падающего электромагнитного поля; 2) эффекты, порождённые амплитудно-фазовой структурой «смешанных» подуровней, возникающих за счёт неадиабатического изменения направления оси квантования ядерного углового момента в магнитной среде.

§2.1 изучается ядерное резонансное рассеяние в двухуровневой среде последовательности одинаковых некогерентных гамма-импульсов. Предполагается, что распределения случайных моментов испускания квантов в двух соседних импульсах отличаются лишь на величину межимпульсного временного интервала, который меньше времени жизни мёссбауэровского ядра в возбужденном состоянии τ_N . Такая задача могла бы возникнуть из эксперимента, где используется техника задержанных совпадений и одновременно амплитудная модуляция гамма-кванта, или если бы каждый раз в ходе генерации отдельного импульса последовательности излучающий электрон двигался по тождественной стохастической траектории. Для решения задачи получена система уравнений Максвелла-фон Неймана для электромагнитного поля гамма-кванта и матрицы плотности ансамбля мёссбауэровских ядер, описывающая распространение гамма-импульса слабой интенсивности и произвольной формы в каналах ядерного рассеяния вперед и ядерной дифракции. Найдено выражение для интенсивности сигнала резонансного отклика двухуровневой среды, которое после усреднения по распределению моментов испускания гамма-квантов в отдельном импульсе последовательности приобретает вид

$$\langle I_{\text{рас}}^s(t) \rangle = I_0 \sum_{m,l} a_{\text{рез}}^s(t-t_m) a_{\text{рез}}^{s*}(t-t_l) \exp(i\varphi_{ml}) \quad (1),$$

где I_0 – интенсивность потока падающего излучения; $\varphi_{ml} = \omega_\gamma(t_m - t_l)$; $t_m - t_l$ – временной интервал между l -ым и m -ым импульсами; $a_{\text{рез}}^s(t-t_m)$ – поляризационные проекции огибающей вектор-потенциала резонансного рассеянного излучения. Проведен анализ выражения (1) для последовательности из двух гамма-импульсов. В канале ядерного рассеяния вперед в качестве «гамма-оптической» среды выбрана пластина γ -Fe, имеющая коэффициент ядерного резонансного поглощения $\mu_{\text{обр}} \approx 27$. В канале ядерной дифракции в качестве «гамма-оптической» среды выбрана пластина γ -Fe₂O₃ при условиях чисто ядерной двухволновой дифракции (7,7,7), полагая, что падающее излучение поляризовано в плоскости дифракционного рассеяния. Показано, что при $\varphi_{12} = 2\pi$ имеет место конструктивная интерференция, приводящая к усилению сигнала резонансного отклика. Если $\varphi_{12} = \pi$, то имеет место деструктивная интерференция, приводящая к ослаблению сигнала резонансного отклика и изменению его формы. Получено, что учет мозаичности реального кристалла приводит к доминирующей роли конструктивной интерференции в канале ядерной дифракции при любых значениях фазы φ_{12} .

В §2.2 рассмотрено ядерное резонансное рассеяние в двухуровневой среде почти прямоугольного импульса гамма-излучения, который может быть получен, например, при прохождении гамма-квантов естественного радиоактивного источника через магнитный образец, испытывающий «мгновенное» 90°-перемагничивание в момент времени t_l . При условиях синфазного детектирования получено выражение для сигнала резонансного отклика относительно t_l , который представляет собой вспышку с максимальной амплитудой, равной амплитуде падающего гамма-импульса, что находится в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными. Показано, что такая форма сигнала РО связана с отличием формы падающего гамма-импульса от ступенчатой и является результатом интерференции амплитуд резонансных откликов от отдельных составляющих импульса. Найдено, что увеличение коэффициента ядерного резонансного поглощения магнитной среды, определяющего форму падающего излучения, приводит к увеличению максимальной интенсивности сигнала РО и его локализации в более коротком временном интервале. В §2.3 изучаются квантовые интерференционные эффекты, возникающие в ходе ядерного резонансного рассеяния одиночного импульса СИ вперед в магнитной среде при «мгновенных» изменениях направления вектора намагниченности

насыщения. Получена система уравнений Максвелла-фон Неймана для проекций огибающей вектор-потенциала поля гамма-кванта в базисе круговых поляризаций a_p и матрицы плотности ρ , описывающей ядерные переходы, разрешенные правилами отбора по магнитному квантовому числу, которая определяет ядерное резонансное рассеяние импульса СИ вперед в многоуровневой среде, где ось квантования ядерного углового момента «мгновенно» меняет свое направление произвольное число раз на любые углы. Проанализирована форма сигнала резонансного отклика к х-поляризованному импульсу СИ для антиферромагнетика $^{57}\text{FeBO}_3$ при однократном и двукратном перемагничивании образца. Показано, что однократное перемагничивание на угол $\pi/2$ в момент t_1 , соответствующий минимуму квантовых сверхтонких биений (КСБ), не меняет их частоту, но приводит к изменению поляризации сигнала РО и уменьшению при $t > t_1$ его интегральной интенсивности почти в 3 раза. Последнее является следствием частичного закрытия когерентного канала распада коллективного ядерного возбуждения, созданного падающим импульсом СИ. Однократное перемагничивание на угол $\pi/2$ в момент t_1 , соответствующий максимуму КСБ, приводит при $t > t_1$ к изменению картины квантовых биений, уменьшению интегральной интенсивности сигнала РО в 1.5 раза, но при этом сохраняет его поляризацию. Вторичное перемагничивание образца на угол $\pi/2$ при $t_2 > t_1$ и возвращение оси квантования ядерного углового момента в прежнее положение не приводит в общем случае к восстановлению характера распада ядерного экситона в когерентном канале, поэтому при $t > t_2$ форма сигнала РО, будет определяться моментами t_1 и t_2 . Такое поведение сигнала РО связано с неадиабатическим характером изменения направления оси квантования ядерного углового момента, в результате чего, например, в случае однократного перемагничивания образца, при $t > t_1$ ядерные переходы возбуждаются не между «чистыми» сверхтонкими подуровнями, описываемыми волновыми функциями

$$\begin{aligned}\psi_{g_1}(t) &= \exp(im_{g_1}\omega_g t) \cdot \psi_{g_1}(0) \\ \psi_{e_1}(t) &= \exp((im_{e_1}\omega_e - \Gamma/2)t) \cdot \psi_{e_1}(0),\end{aligned}$$

а между смешанными подуровнями, описываемыми волновыми функциями

$$\Phi_g(t) = \exp(im_g\omega_g t) \sum_{g_1} d_{gg_1}^{(I_g)}(\pi/2) \cdot \exp\{-i(m_g - m_{g_1})\omega_g t_1\} \Psi_{g_1}(0)$$

$$\Phi_e(t) = \exp((im_e\omega_e - \Gamma/2)t) \sum_{e_1} d_{ee_1}^{(I_e)}(\pi/2) \cdot \exp\{-i(m_e - m_{e_1})\omega_e t_1\} \Psi_{e_1}(0).$$

Индуктируемая таким способом интерференция в индивидуальных токах ядерных переходов между смешанными подуровнями формирует картину ядерных биений сигнала РО.

Третья глава посвящена изучению квантовых интерференционных эффектов в ядерном резонансном рассеянии гамма-излучения под действием внешнего радиочастотного поля. Считается, что в качестве «гамма-оптической» среды можно использовать совершенные ферро-, антиферро- магнетики, для того чтобы исключить влияние неоднородного разброса частот ларморовской прецессии ядерного углового момента и флуктуаций направления его оси квантования, вызванных случайными изменениями направления электронного спина мёссбауэровского иона. Во временном диапазоне рассмотрены два типа эффектов, индуцируемых внешним РЧ полем $\vec{H}_{pч}$ с частотой Ω . В первом случае $\vec{H}_{pч}$ является осциллирующим и перпендикулярным внешнему постоянному магнитному полю $\vec{H}_{вн}$ (эффект Мёссбауэр–ЯМР двойного резонанса). Во втором случае $\vec{H}_{вн} = 0$, а $\vec{H}_{pч}$ является вращающимся полем, чья амплитуда вполне достаточна, чтобы образец находился в однодоменном состоянии. В §3.1 рассматривается квантовая интерференция гамма-кванта самим с собой в канале ядерного рассеяния СИ вперед в режиме Мёссбауэр–ЯМР двойного резонанса, когда частота внешнего осциллирующего РЧ поля совпадает с расстоянием между подуровнями энергии основного, либо возбужденного состояния ядра. Выведена соответствующая система уравнений Максвелла-фон Неймана в случае антиферромагнетика типа «легкая плоскость», намагниченного до насыщения, когда гамильтониан сверхтонкого взаимодействия H_{hf} имеет вид

$$H_{hf} = \hbar \sum_{j=e,g} \omega_j (I_{jz} \cos \beta(t) + I_{jx} \sin \beta(t)),$$

где $\beta(t) = \arctg [C \cdot \cos(\Omega \cdot (t - t_1))]$; $C = |\vec{H}_{pч}|/|\vec{H}_{вн}|$. Матрица плотности значительно упрощается при $C < 1$ (классический Мёссбауэр–ЯМР двойной резонанс) за счет перехода во вращающуюся систему координат. В этом случае получены аналитические выражения для компонент интенсивности сигнала РО «гамма-оптической» тонкой среды в базисе линейных поляризаций к z-поляризованному импульсу СИ при условии, что частота внешнего РЧ поля совпадает с величиной сверхтонкого расщепления возбужденного ядерного уровня ω_e . Найдено, что возмущение процесса ядерного резонансного рассеяния СИ в режиме Мёссбауэр–ЯМР двойного резонанса приводит к появлению в

сигнале резонансного отклика квантовых биений (осцилляций Раби), которые заметны в интервале времени $\Delta t \sim \tau_N$, начиная с $C = 0.1$. По результатам численного моделирования показано появление осцилляций Раби и в сигнале РО «гамма-оптической» толстой среды при $C < 1$. Механизм возникновения квантовых интерференционных эффектов, индуцируемых внешним осциллирующим РЧ полем наиболее понятен в случае Мёссбауэр-ЯМР двойного резонанса. Например, при $\Omega = \omega_e$ падающее гамма-излучение будет стимулировать ядерные переходы в системе смешанных подуровней (уровней квазиэнергии), основного и возбужденного состояния ядра, описываемых волновыми функциями

$$\Phi_g(t) = \exp(i m_g (\omega_g t - \omega_e t_1)) \Psi_g(0)$$

$$\Phi_e(t) = \exp((i m_e C \omega_e - \Gamma)t/2) \sum_{e_1} d_{ee_1}^{(I_e)}(-\pi/2) \cdot \exp(i m_{e_1} \omega_e (t - t_1)) \Psi_{e_1}(0).$$

Это приводит к тому, что квантовые биения сигнала РО на частотах $m_{e_1} \omega_e - m_g \omega_g$ будут модулироваться осцилляциями Раби с частотами $m_e C \omega_e / 2$. При $C \geq 1$ приближение вращающего поля уже некорректно, однако концепция смешанных подуровней, меняющих картину квантовых биений сигнала РО, остается в силе. В §3.2 проведено теоретическое изучение квантовых интерференционных эффектов в режиме Мёссбауэр-ЯМР двойного резонанса в канале пространственного некогерентного рассеяния гамма-излучения, когда волновой вектор рассеянного гамма-кванта $\vec{k}_{2\gamma}$ равен по абсолютной величине волновому вектору $\vec{k}_{1\gamma}$ падающего гамма-кванта, но не совпадает с ним по направлению, которое не является также одним из направлений брэгговского рассеяния. Выведены системы уравнений для матрицы плотности, описывающей взаимодействие гамма-кванта с ансамблем мёссбауэровских ядер в одночастичном приближении в двух случаях: 1) пространственное некогерентное рассеяние гамма-излучения естественного радиоактивного источника через канал конверсионных электронов (КЭ), где получено выражение для вероятности испускания конверсионного электрона $P_{1\gamma}(t)$; 2) пространственное некогерентное рассеяние синхротронного излучения, где получено выражение для вероятности испускания рассеянного гамма-кванта $P_{2\gamma}(t)$. Показано, что оба выражения имеют одинаковую временную зависимость, так как описывают один и тот же процесс распада возбужденного ядерного состояния. Проанализирована временная эволюция сигнала некогерентного резонансного отклика $I(t) \sim 1 - P_{2\gamma}(t)/P_{2\gamma}(\infty)$ для ферромагнетика $\alpha\text{-Fe}$ при точном выполнении условия Мёссбауэр-ЯМР двойного резонанса в 14.413 кэВ состоянии изотопа

^{57}Fe и детектировании гамма-квантов, испущенных рассеивателем в направлении $\vec{k}_{2\gamma}$ в режиме движения с постоянной скоростью. Показано, что увеличение параметра C приводит к одновременному увеличению частоты и уменьшению амплитуды осцилляций Раби (рис.1).

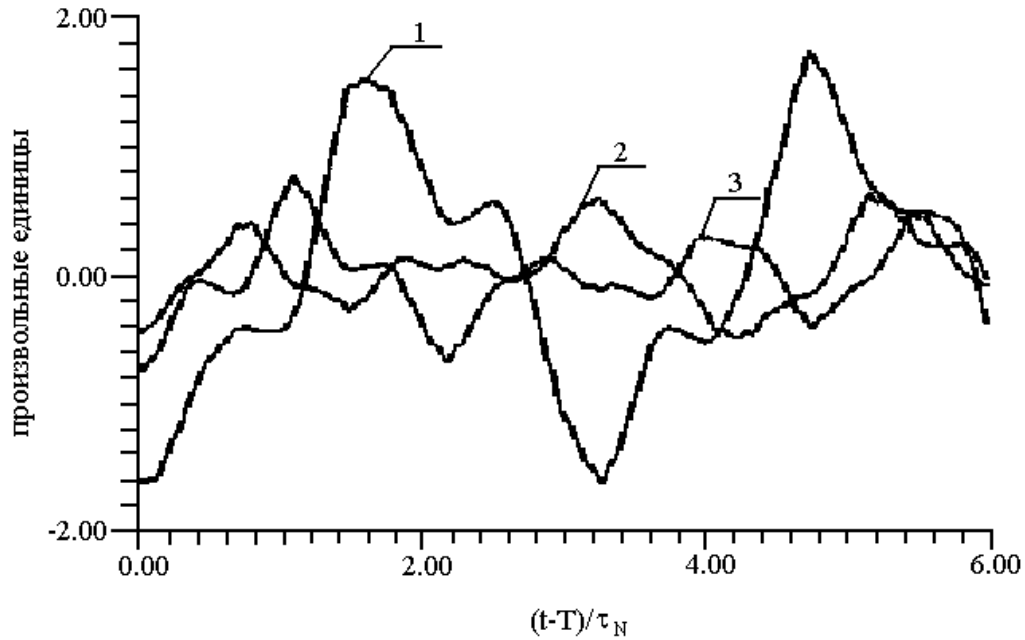


Рис.1 Временные зависимости $I(t) \exp(t/\tau_N)$. $\Delta_{2\gamma} = -9,75$ МГц, $\theta_2 = 0$.

1 – $C = 0,2$; 2 – $C = 0,3$; 3 – $C = 0,4$

Последнее связано с тем, что с увеличением C детектируемые гамма-кванты становятся все более нерезонансными и интенсивность сигнала некогерентного РО падает. Таким образом, при постановке возможных экспериментов важно подобрать разумное соотношение между амплитудами внешних РЧ и постоянного магнитного поля с тем, чтобы минимизировать время по надёжному определению амплитуды и частоты осцилляций Раби в интервале $0 < t \leq \tau_N$.

. В §3.3 рассмотрены квантовые интерференционные эффекты в ядерном рассеянии синхротронного излучения, индуцируемые вращающимся РЧ полем. Выведена соответствующая система уравнений Максвелла-Блоха для магнетика, находящегося в однодоменном состоянии, когда гамильтониан сверхтонкого взаимодействия H_{hf} имеет вид

$$H_{hf} = \hbar \sum_{j=e,g} \omega_j (\vec{e}_{hf}(t) \cdot \vec{I}_j),$$

где единичный вектор $\vec{e}_{hf}(t) = \cos(\Omega(t - t_1))\vec{e}_z + \sin(\Omega(t - t_1))\vec{e}_x$ задает вращающееся в плоскости образца направление оси квантования угловых моментов основного и возбужденного состояния ядра. Проанализировано влияние интерференционных эффектов, порождаемых вращающимся РЧ полем на картину

квантовых биений резонансного отклика магнитной среды. Адиабатически медленное ($\Omega \ll \omega_j$) вращение оси квантования ядерных угловых моментов I_j не меняет картину квантовых биений неполяризованного сигнала РО, т.к. в этом случае подуровни ядерных состояний описываются «чистыми» волновыми функциями $\Psi_j(t)$. Сигнал поляризованного РО испытывает медленные квантовые биения с частотой 2Ω , так как формируется декартовыми проекциями огибающей $\vec{a}^{pe3}(t, l_{обp})$ вектор-потенциала поля резонансно рассеянного излучения. Если $\Omega \sim \omega_j$, то частоты ларморовской прецессии ядерных угловых моментов I_j относительно вращающейся оси квантования будут $m_j \omega_j^R$, где $\omega_j^R = \sqrt{\omega_j^2 + \Omega^2}$, m_j - магнитные квантовые числа и, следовательно, волновые функции $\Phi_j(t)$ описывают смешанные подуровни (уровни квазиэнергии) основного и возбужденного состояний ядра. При $\Omega < \omega_e$ интерференция индивидуальных токов ядерных переходов в системе уровней квазиэнергии порождает картину квантовых биений сигнала РО «гамма-оптической» среды. При $\Omega > \omega_e$ становится заметным «смешивание» уровней квазиэнергии, вызванное квадрупольным взаимодействием, что ведет к изменению картины квантовых биений сигнала РО. При $\Omega \gg \omega_e$ вектор \vec{e}_{hf} вращается так быстро, что ядерный угловой момент I_j «видит» только его среднюю величину

$$\langle \vec{e}_{hf} \rangle = (1 / 2T_{pч}) \int_0^{2T_{pч}} dt \vec{e}_{hf}(t).$$

В этом случае гамильтониан H_{hf} принимает вид

$$H_{hf} = \hbar \sum_{j=e,g} \omega_j (\langle \vec{e}_{hf}(t) \rangle \cdot \vec{I}_j)$$

и равен нулю, поэтому картина квантовых биений сигнала РО магнитной среды формируется за счет квадрупольного взаимодействия мессбауэровского ядра с локальным окружением. Как следует из анализа эффектов, порождаемых вращающимся РЧ полем, форма сигнала резонансного отклика магнитной среды очень чувствительна к частоте вращения и начальной фазе вращающегося сверхтонкого поля. Поэтому: 1) появляется ещё одна возможность для проверки характера квантования ядерного углового момента во вращающемся магнитном поле; 2) для антиферромагнетиков типа «легкая плоскость» на основе ядерного резонансного рассеяния СИ может появиться дополнительный экспериментальный метод исследования магнито-акустических взаимодействий, которые вносят вклад в начальную фазу периодического сверхтонкого поля на ядре [9].

В четвертой главе исследуются квантовые интерференционные эффекты в ядерном резонансном рассеянии гамма-излучения, которые можно использовать для анализа ближнего порядка в спектрально-неоднородных магнитных средах, таких как магнитные сплавы, порошки, металлические стекла и т.д. Традиционной задачей гамма-резонансной спектроскопии для данной области исследований конденсированного состояния вещества является нахождение распределения локальных СТ полей в образце из анализа формы мёссбауэровского спектра поглощения. Такой метод хорошо разработан в ГРС, однако допускает неоднозначность результатов из-за способов подгонки экспериментального и теоретического спектров. Снять подобную неоднозначность смогли бы дополнительные методы исследований, основанные на интерференционных эффектах в режимах Мёссбауэр-ЯМР двойного резонанса и «мгновенного» перемагничивания «гамма-оптической» среды, которые возможно реализовать в магнитомягких аморфных материалах. В §4.1 рассматривается метод «радиочастотного сканирования» мёссбауэровского спектра, который основан на интерференции поляризационных состояний гамма-кванта в режиме Мёссбауэр-ЯМР двойного резонанса. При этом предполагается, что резонансные условия выполняются для возбужденного состояния ядра ^{57}Fe . При разных значениях частоты внешнего радиочастотного поля Ω проанализирована форма линии мёссбауэровского спектра поглощения в двух случаях: 1) волновой вектор падающего гамма-кванта \vec{k}_γ параллелен внешнему магнитному полю $\vec{H}_{\text{вн}}$, спектральная линия соответствует ядерному переходу между смешанными подуровнями $|1/2\rangle_g$ и $|-1/2\rangle_e$; 2) $\vec{k}_\gamma \perp \vec{H}_{\text{вн}}$, спектральная линия соответствует ядерному переходу между смешанными подуровнями $|1/2\rangle_g$ и $|1/2\rangle_e$. Действие внешнего РЧ поля на магнитный аморфный образец приводит к уширению спектральной линии и образованию либо провала (случай 1), либо системы 3-х пиков (случай 2). Изменение частоты РЧ поля приводит, например, в первом случае к изменению положения провала на спектральной линии и его глубины. Последняя пропорциональна значениям функции распределения локальных СТ полей $f(H'_{\text{СТ}})$. Таким образом, огибающая провалов, возникающих на спектральной линии при различных значениях Ω позволяет получить вид $f(H'_{\text{СТ}})$ непосредственно из эксперимента. Как следствие, появляется новый метод определения разброса локальных сверхтонких полей в магнитных аморфных порошках и сплавах, где сверхтонкое взаимодействие будет доминирующим. Реализация такого метода будет облегчена тем, что в образцах данного типа эффект магнитострикции, маскирующий эффект Мёссбауэр-ЯМР двойного резонанса, значительно подавлен. В §4.2 изучается метод, названный техникой гамма-эхо. Он основан на «мгновенном» перемагничивании образца в ходе ядерного рассеяния вперед синхротронного излучения и может быть весьма

эффективным, когда магнитная среда является полностью неоднородной. Специфика вводимой техники гамма-эхо заключается в том, что в отличие от спинового или фотонного эха, для её реализации не требуются импульсы падающего гамма-излучения с импульсными площадями $\pi/2$ и π , которые невозможно создать с помощью имеющихся в наличии источников СИ 3-го поколения. Механизм возникновения гамма-эха состоит в следующем. Резонансное взаимодействие импульса СИ с ансамблем мёссбауэровских ядер порождает для каждого разрешенного ядерного перехода совокупность индивидуальных токов ядерных переходов, которые будут прецессировать, относительно направления внешнего магнитного поля с разными частотами, пропорциональными величинам локальных сверхтонких полей в образце. Это приводит к потере временной фазовой когерентности в ансамбле мёссбауэровских излучателей за время дефазировки τ и резкому уменьшению когерентного сигнала РО «гамма-оптической» среды. Если в момент $t_1 = \tau < \tau_N$ «мгновенно» изменить направление внешнего магнитного поля на противоположное, то через время рефазировки τ индивидуальные токи ядерных переходов совпадут по направлению, что приводит к восстановлению временной фазовой когерентности в системе мёссбауэровских излучателей и возникновению в момент $t = 2\tau$ гамма-эха в сигнале РО «гамма-оптической» среды. Для моделирования гамма-эха в ядерном резонансном рассеянии СИ вперед используется система уравнений Максвелла-фон Неймана, усредненная по распределению локальных СТ полей с учетом флуктуаций намагниченности образца, если таковые имеют место. В отсутствие флуктуаций намагниченности получены аналитические выражения для сигнала РО «гамма-оптической» тонкой среды, описывающие образование гамма-эха, чья форма будет определяться функцией распределения $f(H'_{СТ})$. Численное моделирование, проведенное для «гамма-оптической» толстой среды подтверждает эти выводы с той лишь разницей, что максимум сигнала гамма-эха лежит выше по интенсивности, чем соответствующая по времени точка кривой РО среды той же толщины, но в которой нет разброса локальных СТ полей. Это связано с конкуренцией в толстой неоднородной магнитной среде эффектов пространственной и временной фазовой когерентности во взаимодействии гамма-кванта с ансамблем мёссбауэровских ядер, приводящими, соответственно, к образованию эха и более быстрому спаду сигнала РО, чем по закону $\sim \exp(-t/\tau_N)$. Такое свойство может сделать технику гамма-эхо весьма притягательной для исследования распределений локальных магнитных полей в протяженных образцах, где интенсивность сигнала РО значительно больше. Показано, что последовательность из m 180° -перемагничиваний «гамма-оптической» среды в моменты $t_l = (2l - 1)\tau$ ($l = 1, 2, \dots, m$) приводит к возникновению последовательности сигналов гамма-эхо в сигнале резонансного отклика в моменты $t_{el} = 2l\tau$, что может сделать более достоверной информацию о локальном маг-

нитном порядке в образце. Магнитные аморфные структуры являются подходящими объектами для таких экспериментов, так как в этом случае магнитоупругое взаимодействие значительно слабее и многократное перемагничивание не ведет к нагреву образца и потере его магнитных свойств. Рассмотрено влияние флуктуаций макроскопической намагниченности образца на форму сигнала гамма-эхо в двух случаях: 1) «гамма-оптическая» среда является ансамблем суперпарамагнитных частиц с распределением скоростей СПР релаксации, описываемым гауссианом; 2) «гамма-оптическая» среда является массивным магнетиком, находящимся в районе фазового перехода с δ -образным распределением равновесных частот флуктуаций направления намагниченности насыщения. Показано, что, в первом случае, увеличение дисперсии ΔW , а во втором случае увеличение средней частоты W_0 приводит к постепенному уменьшению сигнала гамма-эхо. Эти результаты соответствуют условию наблюдения первичного спинового и фотонного эха: скорость обратимой релаксации не должна быть меньше скорости необратимой релаксации. В §4.3 вводится и моделируется техника гамма-эхо в ядерном резонансном малоугловом рассеянии синхротронного излучения, которая будет эффективной, если размер магнитных неоднородностей лежит в интервале от 1 нм до 1 мкм. Для этого построен теоретический формализм, описывающий процесс малоуглового рассеяния гамма-излучения в ансамбле мёссбауэровских ядер. Получены уравнения, описывающие процесс формирования гамма-эхо в сигнале резонансного отклика магнитной среды с магнитными неоднородностями, имеющие аналитическое решение. Показано, что последовательность m «мгновенных» изменений направления оси квантования ядерного углового момента на противоположное внутри магнитных неоднородностей в моменты времени t_l порождают последовательность сигналов гамма-эхо в моменты времени t_{el} . Изучение временных зависимостей сигнала РО «гамма-оптической» среды через канал малоуглового рассеяния показывает, что форма сигнала гамма-эхо определяется функцией распределения локальных сверхтонких полей $f(H'_{CT})$ внутри магнитной неоднородности. Однако, в отличие от канала ядерного рассеяния вперед она может не модулироваться квантовыми биениями, что будет упрощать интерпретацию возможного эксперимента.

Пятая глава посвящена теоретическому изучению влияния электронных спиновых флуктуаций (ЭСФ) на квантовые интерференционные эффекты в ядерном резонансном рассеянии синхротронного излучения. Такая проблема весьма актуальна для «гамма-оптической» парамагнитной среды, где электронный спин отдельного мёссбауэровского иона случайно меняет своё направление из-за взаимодействия с тепловым и дипольным резервуарами, что приводит к появлению случайной фазы в его собственных волновых функциях. Усреднение

интенсивности сигнала РО парамагнитной среды по случайной фазе ведет к перестройке картины квантовых биений и дает возможность наблюдать проявление ЭСФ в ядерном резонансном рассеянии СИ. Для правильной интерпретации экспериментальных результатов очень полезно построить теоретический формализм и провести моделирование эффектов на примере известных парамагнитных образцов. В §5.1 теоретически исследуются эффекты ЭСФ в ядерном рассеянии СИ вперед в парамагнитной среде включающей индивидуальные ионы $^{57}\text{Fe}^{3+}$ с эффективным спином $S=1/2$. В этом случае система электронно-ядерных подуровней, формируемая за счет сверхтонкого и квадрупольного взаимодействия, имеет достаточно простую структуру (4 уровня для основного состояния и 8 уровней для возбужденного состояния ядра), а спиновые флуктуации имеют место только в системе двух электронных подуровней. Для решения проблемы получена соответствующая система уравнений Максвелла для огибающей вектор-потенциала поля резонансного отклика парамагнитной среды и уравнений Лиувилля, которые определяют временную эволюцию состояний мёссбауэровского иона под действием падающего синхротронного излучения. Предполагается, что электронные спиновые флуктуации являются стационарным марковским процессом и описываются суперматрицей релаксации с ненулевыми матричными элементами $R_{fff'} = W_{ff'}$ - скорости продольной релаксации; $R_{fff'} = -\gamma_{ff'}$ ($f \neq f'$) – скорости поперечной релаксации. Эта модель будет корректна, если время разрешения временного детектора гамма-квантов τ_d намного больше корреляционного времени флуктуационного процесса τ_c . Численное моделирование влияния электронных спиновых флуктуаций на квантовые интерференционные эффекты в ядерном рассеянии СИ вперед проводилось на примере белкового комплекса цитохром – c_2 . Рассматривалось два случая: 1) к образцу приложено внешнее магнитное поле, достаточное, чтобы расщепить крамеров дублет $|\pm 1/2\rangle$ на два подуровня, равнозаселенных вплоть до температур $\sim 1\text{ К}$. 2) Внешнее магнитное поле отсутствует. В первом случае, эволюция матрицы плотности системы электронно-ядерных уровней определяется через её матричные элементы ρ_{ge}^{ff} , диагональные по электронным индексам. Поэтому влияние ЭСФ на сигнал резонансного отклика будет связано со скоростями продольной релаксации $W_{ff'} (W_{1/2-1/2} \cong W_{-1/2 1/2} = W)$. Показано, что увеличение W приводит к постепенному исчезновению в сигнале РО квантовых сверхтонких биений, которые более устойчивы при изменениях параметра W , чем линии мёссбауэровского спектра поглощения. Скорость спада РО с увеличением W сначала растет, однако этот рост будет замедляться, так что, начиная с $W = 50\Gamma$ скорость спада сигнала РО уменьшается, и он постепенно переходит в сигнал РО «гамма-оптической» двухуровневой среды, моду-

лированный квантовыми квадрупольными биениями. Во втором случае, эволюция матрицы плотности системы электронно-ядерных уровней определяется всеми матричными элементами $\rho_{ge}^{ff'}$. Поэтому влияние ЭСФ на сигнал резонансного отклика будет связано как со скоростями продольной релаксации $W_{ff'}$, так и со скоростями поперечной релаксации $\gamma_{ff'}$, которые в стохастической модели Клаузера-Блюма имеют следующий вид $\gamma_{1/2-1/2} = \gamma_{-1/2 1/2} = -2W$.

Показано, что при этих условиях возникает иная картина квантовых биений сигнала РО, которая будет иметь более сложную зависимость от параметра W . Однако, общая тенденция стремления к сигналу РО «гамма-оптической» двухуровневой среды, модулированному квантовыми квадрупольными биениями, остается неизменной. Такое поведение сигнала РО обусловлено появлением случайной фазы у каждого из индивидуальных токов ядерных переходов $\langle \vec{j}_{eg} \rangle$, формирующих отклик, и, следовательно, потерей временной фазовой когерентности между ними. Если $W \cong \Gamma$, то вероятность появления случайных фаз в индивидуальных токах $\langle \vec{j}_{eg} \rangle$ за время жизни ядра в возбуждённом состоянии мала, чтобы заметно изменить форму резонансного отклика «гамма-оптической» среды. Увеличение W в интервалах $\Gamma < W \leq \omega_{eg}$ приводит к увеличению вероятности появления случайных фаз в индивидуальных поперечных токах $\langle \vec{j}_{eg} \rangle$ во всё более ранние моменты времени. Усреднение интенсивности сигнала РО по случайным фазам приводит к постепенному «замыванию» картины квантовых биений и более быстрому спаду во времени. Если $W > \omega_{eg}$, то индивидуальные токи $\langle \vec{j}_{eg} \rangle$ уже не успевают отслеживать отдельные состояния электронного спина. Увеличение W приводит к тому, что в результате переходного процесса временная фазовая когерентность между отдельными токами $\langle \vec{j}_{eg} \rangle$ восстанавливается и, следовательно, скорость спада сигнала РО стремиться к первоначальной величине. Однако теперь частоты прецессии ω_{eg} будут определяться средним значением z -проекции электронного спина $\rho_{1/2}^{(0)} \langle 1/2 | S_z | 1/2 \rangle + \rho_{-1/2}^{(0)} \langle -1/2 | S_z | -1/2 \rangle$, которое при одинаковых заселённостях электронных подуровней равно нулю. Таким образом картина квантовых биений сигнала РО формируется квадрупольными взаимодействиями, не реагирующими на флуктуации направления электронного спина.

В §5.2 проводится теоретическое изучение эффектов ЭСФ в ядерном рассеянии СИ вперед в парамагнитных средах, включающих индивидуальные ионы $^{57}\text{Fe}^{3+}$ либо с эффективным спином $3/2$, либо $5/2$. С помощью формализма суперопе-

раторов построены совместная система уравнений Максвелла для огибающей поля резонансного гамма-кванта и уравнений фон-Неймана для матрицы плотности системы электронно-ядерных уровней, чья электронная составляющая включает несколько крамеровских дублетов. Без ограничения общности считается, что электронные спиновые флуктуации описываются стационарным марковским процессом в рамках неадиабатической модели Клаузера-Блюма, в которой суперматрица релаксации имеет вид:

$$(M_i m_g M_f m_e | R | M_{i'} m_{g'} M_{f'} m_{e'}) = (W_{ff'} \delta_{fi} \delta_{f'i'} + \\ + (W_{ff'} + W_{ii'}) \delta_{ff'} \delta_{ii'} (1 - \delta_{fi}) \delta_{gg'} \delta_{ee'} ,$$

где $M_i, M_f, M_{i'}, M_{f'}$ -магнитные квантовые числа электронных подуровней, в то время как $m_e, m_g, m_{e'}, m_{g'}$ -магнитные квантовые числа ядерных подуровней.

Проведено численное моделирование эффектов ЭСФ в ядерном рассеянии СИ вперед в изопенециллине ($S=3/2$) и пероксидазе (соединение 1) ($S=5/2$). Так как суперматрица релаксации состоит из скоростей ЭР W_{if} , то с точки зрения полезности информации проанализирован только случай, когда к образцу приложено внешнее магнитное поле в несколько сотых тесла. При температурах $T < 4,2 K$ скорости ЭР определяются спин-спиновыми взаимодействиями. Так как заселен только расщеплённый крамеров дублет $|\pm 1/2\rangle$, то зависимость формы сигнала РО от $W = W_{-1/2 1/2} \cong W_{1/2 -1/2}$ будет такой же, как и для парамагнитной среды с $S=1/2$. При $T > 4,2 K$ скорости ЭР определяются спин-решеточными взаимодействиями, зависящими от температуры образца. Таким образом, температурная эволюция сигнала РО определяется конкуренцией процессов изменения временной фазовой когерентности в ансамбле индивидуальных токов $\langle \vec{j}_{ge}^{(f)} \rangle$ ядерных переходов в зависимости от скоростей ЭР W_{if} и перестройки картины квантовых биений, за счёт выравнивания заселённостей $\rho_f^{(0)}$ расщепленных крамеровских дублетов. Для рассматриваемых сред второй процесс будет доминирующим при $T \leq 150 K$, в то время как первый - при $T > 150 K$. В §5.3 теоретически исследуется влияние ЭСФ на процесс ядерного рассеяния СИ вперед в парамагнитных средах, включающих индивидуальные ионы $^{57}Fe^{4+}$ с эффективным спином $S=1$, либо индивидуальные ионы $^{57}Fe^{2+}$ с эффективным спином $S=2$. Для этого используется полученная в предыдущем параграфе система уравнений Максвелла-фон Неймана с учетом структуры уровней основного состояния внешней электронной оболочки мёссбауэровского иона с целым спином. Численное моделирование эффектов ЭСФ в ядерном рассеянии СИ вперед, вызванное спин-решеточными взаимодействиями, проведено для пероксидазы (соединение II) ($S=1$) и для «picket-fence» железо-

порфиринового комплекса $[Fe(CH_3COO)(TP_{piv} P)]^-$ ($S=2$) при условии, что внешнее магнитное поле в несколько тесла приложено к образцу. Для рассматриваемых сред показано, что в интервале температур $T \leq T_0$ ($T_0 \sim 15K$ для пероксидазы (соединение II), $T_0 \sim 40K$ для железо-порфиринового комплекса) температурная эволюция сигнала РО определяется, в основном, процессом изменения временной фазовой когерентности в ансамбле индивидуальных токов $\langle \vec{j}_{ge}^{(f)} \rangle$ ядерных переходов в зависимости от скоростей ЭР W_{if} . В результате картина квантовых биений сигнала РО определяется сверхтонким магнитным взаимодействием, усреднённым по заселённостям электронных подуровней $\rho_f^{(0)}$. При $T > T_0$ выравнивание заселённостей $\rho_f^{(0)}$ определяет температурную эволюцию сигнала РО, который стремится к сигналу РО двухуровневой среды, модулированному квадрупольными биениями. **В шестой главе** рассматриваются квантовые интерференционные эффекты, стимулированные внешним РЧ полем, которые приводят к значительному изменению резонансного поглощения «гамма-оптической» среды, что вызвано развитием новых подходов для реализации режима вынужденной эмиссии гамма-излучения. В §6.1 изучаются эффекты временной фазовой когерентности и интерференции поляризационных состояний гамма-кванта, посредством которых внешнее РЧ возмущение делает магнитную среду более прозрачной для резонансных гамма-квантов в канале ядерного рассеяния вперед. Предполагается, что среда является антиферромагнетиком типа «легкая плоскость», находящемся при комнатных температурах, а падающее гамма-излучение поляризовано вдоль оси квантования ядерных угловых моментов I_j . При этих условиях проанализировано выражение для интегрального изменения интенсивности гамма-излучения между левой и правой границей образца $P_z(t_1, l_{обp}) = \int_0^\infty dt (I_z(t, l_{обp}) - I_z(t, 0))$, а также его среднее по моменту времени t_1 включения РЧ поля

$$\langle P_z(t_1, l_{обp}) \rangle_{t_1} = (\Omega / 2\pi) \int_0^{2\pi/\Omega} dt_1 P_z(t_1, l_{обp}).$$

Показано, что увеличение C при условии Мёссбауэр-ЯМР двойного резонанса в возбужденном состоянии ядра или частоты вращающегося РЧ поля приводит к уменьшению $P_z(t_1, l_{обp})$, зависящему от начальной фазы поля Ωt_1 , и $\langle P_z(t_1, l_{обp}) \rangle_{t_1}$. Это связано с тем, что с увеличением параметров внешних РЧ возмущений (C или Ω) структура ядерных состояний может значительно отличаться от той, которая описывается стационарными волновыми функциями

$\Psi_j(t)$. Поэтому, если падающее гамма-излучение возбуждает резонансным образом отдельный ядерный переход между «чистыми» СТ подуровнями до начала действия внешнего РЧ возмущения на магнитную среду, то во время его действия падающее излучение становится нерезонансным по отношению ко всем ядерным переходам внутри возникающей системы смешанных подуровней. В §6.2 теоретически изучаются квантовые интерференционные эффекты, вызванные слабым монохроматическим РЧ полем в схеме усиления резонансного гамма-излучения с не инверсной заселенностью модельной системы хорошо разрешенных ядерных подуровней, которая получается за счет зеемановского и квадрупольного взаимодействия ядерного углового момента ($I_g = 3/2$, $I_e = 1/2$) в «гамма-оптической» тонкой диамагнитной среде, находящейся при низких ($\sim mK$) температурах. Считается, что не инверсная заселенность возбужденного ядерного состояния может создаваться некогерентной накачкой с низкой интенсивностью λ : либо потоком тепловых нейтронов, либо вспышкой некогерентного рентгеновского излучения. Рассмотрены два случая: 1) почти аксиально-симметричное квадрупольное взаимодействие, внешнее постоянное магнитное поле направлено вдоль Z принципиальной оси ГЭП; 2) аксиально-симметричное квадрупольное взаимодействие, внешнее магнитное поле составляет угол $\beta \ll 1$ с Z принципиальной осью ГЭП. В первом случае с помощью некогерентной накачки заселяется подуровень $|5\rangle = |1/2\rangle_e$ возбужденного состояния ядра, временная фазовая когерентность в системе подуровней основного состояния ядра индуцируется за счет ЯМР-переходов между нижним подуровнем $|1\rangle = |1/2\rangle_g$ и парой смешанных подуровней $|2\rangle = (1/\sqrt{2})(|-1/2\rangle_g + |3/2\rangle_g)$, $|3\rangle = (1/\sqrt{2})(|-1/2\rangle_g - |3/2\rangle_g)$ с частотным расстоянием $\delta < \Gamma$, циркулярно-поляризованные резонансные гамма-кванты возбуждают ядерные переходы $|2\rangle \leftrightarrow |5\rangle$ и $|3\rangle \leftrightarrow |5\rangle$. При этих условиях проанализировано выражение первого порядка малости для скорости изменения заселенности возбужденного состояния ядра

$$B_e = \frac{\partial(\rho_{55}^{(1)} + \rho_{66}^{(1)})}{\partial t}$$

Получено условие

$$\lambda(1/\Gamma - 1/3W)/6 - 3\omega_g^{PQ2}[2\gamma/W + 1 - (\gamma + \gamma_1)(\delta^2 + 2\Gamma\gamma_1)/\Gamma(\delta^2 + \gamma_1^2)]/8[(\delta/2)^2 + \gamma^2] \geq 0,$$

которое определяет режимы вынужденной эмиссии гамма-излучения и отсутствия взаимодействия ядер с резонансными гамма-квантами. Здесь W – скорость продольной релаксации ядра с подуровней $|3\rangle, |2\rangle$ на подуровень $|1\rangle$; γ – скорость потери временной фазовой когерентности между подуровнями $|1\rangle, |2\rangle$

и $|1\rangle, |3\rangle$; γ_1 - скорость потери временной фазовой когерентности между подуровнями $|2\rangle, |3\rangle$; ω_g^{PQ} - частота Раби монохроматического РЧ поля. Во втором случае с помощью некогерентной накачки заселяется подуровень $|5\rangle = |-1/2\rangle_e$; временная фазовая когерентность в системе подуровней основного состояния ядра создается за счет ЯМР-переходов между парой нижних подуровней $|1\rangle = (1/\sqrt{2})(|-1/2\rangle_g + |3/2\rangle_g)$, $|2\rangle = (1/\sqrt{2})(|1/2\rangle_g - |3/2\rangle_g)$ и подуровнем $|3\rangle = |-1/2\rangle_g$; линейно поляризованные вдоль направления внешнего магнитного поля резонансные гамма-кванты возбуждают ядерный переход $|3\rangle \leftrightarrow |5\rangle$. Условие, определяющее режимы вынужденной эмиссии гамма-излучения и отсутствия взаимодействия ядер с резонансными гамма-квантами имеет вид:

$$\lambda(1/\Gamma - 1/6W)/9 - 4\omega_g^{PQ2}\gamma/3W[(\delta/2)^2 + \gamma^2] + \\ + \omega_g^{PQ}\delta/3[(\delta/2)^2 + \gamma^2] - 1/2\bar{\Delta}^2 \geq 0,$$

где $\delta \leq \Gamma$ - частотное расстояние между подуровнями $|1\rangle, |2\rangle$; W - скорость продольной релаксации ядра с подуровня $|3\rangle$ на подуровни $|1\rangle, |2\rangle$; γ - скорость потери временной когерентности между подуровнями $|1\rangle, |3\rangle$ и $|2\rangle, |3\rangle$; $\bar{\Delta}$ - разность частот резонансного и нерезонансного ($|1\rangle \leftrightarrow |5\rangle$) ядерного перехода. В §6.3 теоретически изучаются квантовые интерференционные эффекты в схеме усиления гамма-излучения без инверсии, порождаемые слабым бихроматическим РЧ полем. Считается, что система ядерных подуровней формируется за счет аксиально-симметричного квадрупольного и зеемановского взаимодействий. Линейно-поляризованная перпендикулярно направлению внешнего магнитного поля некогерентная накачка заселяет подуровень $|5\rangle = |1/2\rangle_e$; временная фазовая когерентность, приводящая к уменьшению резонансного поглощения гамма-квантов, создается за счет ЯМР-переходов между нижним подуровнем $|1\rangle = |1/2\rangle_g$ и парой подуровней $|2\rangle = |-1/2\rangle_g$, $|3\rangle = |3/2\rangle_g$ с частотным расстоянием $\delta \gg \Gamma$, линейно поляризованные вдоль направления внешнего магнитного поля резонансные гамма-кванты возбуждают ядерный переход $|2\rangle \leftrightarrow |5\rangle$. При этих условиях проанализировано выражение для B_e в зависимости от относительной фазы $\Omega_{32}t_1$ и частот Раби ω_{2g}^{PQ} , ω_{3g}^{PQ} бихроматического РЧ поля. Если

$$c_1 = (2W_{33}/3\omega_{2g}^{PQ})(\lambda(32 + 64W_{22}^2/9\omega_{2g}^{PQ}\bar{\Delta} - 2\lambda W_{22}/3\Gamma) \\ c_2 = c_1 + 4\lambda W_{22}W_{33}/3\omega_{2g}^{PQ}\Gamma), \quad \Omega_{32}t_1 = \pi,$$

то найдено, что при $c_1 < \omega_{3g}^{PQ} - 64\omega_{2g}^{PQ}/9 \leq c_2$ возникает режим вынужденной эмиссии гамма-излучения, в то время как при $c_1 = \omega_{3g}^{PQ} - 64\omega_{2g}^{PQ}/9$ реализуется режим отсутствия взаимодействия ядер с резонансными гамма-квантами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе формализма уравнений Максвелла-фон Неймана теоретически исследованы квантовые интерференционные эффекты, в присутствии внутренних и внешних возмущений, в ядерном резонансном рассеянии гамма-излучения в конденсированных средах что позволяет представить следующие основные результаты:

1. Впервые теоретически изучен эффект гамма-эхо в ядерном резонансном рассеянии синхротронного излучения в каналах рассеяния вперёд и малоуглового рассеяния. Показана его перспективность, как метода исследования распределения локальных сверхтонких полей в магнитомягких аморфных образцах.
2. Показаны новые возможности для изучения распределения локальных сверхтонких полей в спектрально-неоднородных магнитных средах на основе Мёссбауэр-ЯМР двойного резонанса.
3. Изучены эффекты квантовой интерференции, приводящие к изменениям резонансного поглощения падающего гамма-излучения под действием импульсных и радиочастотных возмущений. Получены режимы, при которых происходит существенное увеличение прозрачности многоуровневой «гамма-оптической» магнитной среды с равновесной заселенностью ядерных уровней.
4. Показано, что квантование ядерного углового момента в переменном сверхтонком поле приводит к кардинальной перестройке картины квантовых биений сигнала резонансного отклика магнитной среды, в зависимости от амплитуды, частоты, начальной фазы внешнего радиочастотного поля. Последнее будет иметь принципиальное значение при изучении магнито-акустических свойств ферро-, антиферро- магнетиков типа «лёгкая плоскость».
5. Получено, что взаимодействие мёссбауэровского иона с дипольным и тепловым резервуарами приводит к потере и последующему восстановлению временной фазовой когерентности в резонансном рассеянии синхротронного излучения в парамагнитной среде и, следовательно, к зависимости сигнала резонансного отклика от параметров стохастического процесса. Это открывает новые возможности для исследования спин-решёточных и спин-спиновых взаимодействий в твёрдом теле.

6. В ядерном резонансном рассеянии гамма-излучения проанализированы эффекты пространственной когерентности, полученные при определённой форме падающего гамма-импульса, которые приводят к резкому изменению интенсивности и формы сигнала резонансного отклика двухуровневой «гамма-оптической» среды. Объяснён наблюдавшийся эксперимент с почти прямоугольным гамма-импульсом.

7. Проведено теоретическое исследование схем усиления гамма-излучения без инверсии с монохроматическим и бихроматическим радиочастотными полями в магнетике, парамагнетике и диамагнетике. Получены условия, при которых можно реализовать линейный режим вынужденной генерации гамма-излучения и создавать «тёмные» состояния ядра.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. E.A. Popov, Moessbauer filtration of synchrotron radiation for Laue diffraction under specular reflection condition, 1991, Physica Status Solidi, v.127(a), №2, pp. 207-214.
2. Е.А. Попов, Влияние флуктуаций магнитных моментов микрочастиц на временные зависимости мессбауэровского рассеяния, 1991, Письма в ЖЭТФ, т.54, №2, стр. 365-368.
3. E.A. Popov, Moessbauer filtration of synchrotron radiation: multipulse regime, International Conference on the Applications of the Moessbauer Effect, Vancouver, Canada, August 8-13, 1993, Book of Abstracts, p.81.
4. E.A. Popov, Time evolution of Moessbauer scattering under double gamma-NMR resonance conditions, International Conference on the Applications of the Moessbauer Effect, Vancouver, Canada, August 8-13, 1993, Book of Abstracts, p.82.
5. E.A. Popov, Radiofrequency scanning of unhomogeneously broadened Moessbauer spectra, International Conference on the Applications of the Moessbauer Effect, Vancouver, Canada, August 8-13, 1993, Book of Abstracts, p.115.
6. E.A. Popov, Time evolution of incoherent scattering under double gamma- NMR resonance conditions, 1995, Hyperfine Interactions, v.96, pp. 195-201.
7. E.A. Popov, Moessbauer filtration of synchrotron radiation: multipulse regime, 1995, Journal of Physics: Condensed Matter, v.7, pp. 1427-1435.
8. E.A. Popov, Nuclear coherent scattering of synchrotron radiation under double gamma+NMR resonance conditions, International Conference on the Applications of the Moessbauer Effect, Rimini, Italy, September 10-16, 1995, Book of Abstracts, p.203.
9. E.A. Popov, Coherent response in the forward direction to the almost stepwise gamma-pulse, 1996, Journal of Physics: Condensed Matter, v.8, pp. 5483-5489.

10. E.A. Popov, N.V. Polyakov, and V.A. Zhikharev, Radiofrequency scanning of inhomogeneously broadened Moessbauer spectra, 1996, Solid State Communications, v.100, n.5, pp. 355-357.
11. E.A. Popov, V.I. Kouznetsov, E.A. Yanvarev, Spin-echo effects in nuclear resonant scattering of synchrotron radiation, International Conference on the Applications of the Moessbauer Effect, Rio, Brasil, September 11-16, 1997, Book of Abstracts, p.138.
12. В.И. Кузнецов, Е.А. Попов, Е.А. Январёв, Интерференционные эффекты в гамма-ядерном рассеянии, стимулированные радиочастотным полем, 1998, Известия РАН (сер. физическая), т.62, №2, стр. 422-426.
13. Е.А. Попов, Е.А. Январёв, Влияние радиочастотного возмущения на ядерное рассеяние вперед синхротронного излучения, 1998, Известия РАН (сер. физическая), т.62, №5, стр. 1065-1068.
14. E.A. Popov, V.V. Samartsev, and E.A. Yanvarev, The influence of an external radiofrequency field on the resonance propagation of a short gamma-ray pulse in an "optical" multilevel medium, 1998, Laser Physics, v.8, n.6, pp. 1240-1244.
15. E.A. Popov, E.A. Yanvarev, and V.I. Kouznetsov, Gamma-echo in forward nuclear scattering of synchrotron radiation in an inhomogeneous medium, 1999, Journal of Physics: Condensed Matter, v.11, pp.5321-5330.
16. E.A. Popov, E.A. Yanvarev, and V.I. Kouznetsov, Modulation effects of rotating radiofrequency field in forward nuclear scattering of synchrotron radiation, 1999, Hyperfine Interactions, v.122, pp. 333-343.
17. E.A. Popov, V.I. Kouznetsov, E.A. Yanvarev, Gamma-echo in nuclear forward scattering of synchrotron radiation in inhomogeneous medium, International Conference on the Applications of the Moessbauer Effect, Garmisch-Partenkirchen, Germany, August 29-September 03, 1999, p. T1/43.
18. E.A. Popov, V.I. Kouznetsov, E.A. Yanvarev, The possibilities of nuclear forward scattering of synchrotron radiation for investigation of paramagnetic relaxation into high- and intermediate- spin complexes, International Conference on the Applications of the Moessbauer Effect, Garmisch-Partenkirchen, Germany, August 29-September 03, 1999, Book of Abstracts, p. T9/58.
19. E.A. Popov, E.A. Yanvarev, and V.I. Kouznetsov, The possibilities of the method of nuclear forward scattering of synchrotron radiation for the investigation of paramagnetic relaxation in high- and intermediate- spin complexes, 2000, Proceedings of SPIE, v.4061, pp. 363-371.
20. E.A. Popov, V.I. Kouznetsov, and V.P. Bugrov, Induced gamma-emission in inversionless schemes with radiofrequency field, 2000, Proceedings of SPIE, v.4061, pp.372-380.
21. E.A. Popov, E.A. Yanvarev, and V.I. Kouznetsov, The role of the spin relaxation effects into both magnetic nanoclusters and low-spin paramagnetic complexes in nu-

clear forward scattering of synchrotron radiation, 2000, Proceedings of SPIE, v.4061, pp. 381-391.

22. Е.А. Попов, Е.А. Январев, В.И. Кузнецов, Интерференционные эффекты в направленном вперед рассеянии синхротронного излучения на ядрах, обусловленные “мгновенными” изменениями оси квантования ядерного углового момента, 2000, Известия РАН (сер. физическая), т.64, №10, стр. 1986-1991.

23. Е.А. Попов, Е.А. Январев, В.И. Кузнецов, Влияние электронных спиновых флуктуаций на ядерное резонансное рассеяние синхротронного излучения: низкоспиновые белковые комплексы, 2000, Известия РАН (сер. физическая), т.64, №10, стр. 2117-2123.

24. Е.А. Popov, Gamma-echo in nuclear resonant scattering of synchrotron radiation, 2001, Laser Physics, v.11, n.3, pp 419-423.

25. Е.А. Popov, Amplification of gamma radiation without inversion in the scheme with bichromatic radiofrequency field, 2001, Proceedings of SPIE, v.4065, pp. 381-388.

26. Е.А. Popov, Е.А. Yanvarev, Sh.Sh. Bashkirov, and V.I. Kouznetsov, Investigation of electron relaxation in the metal proteins containing the single paramagnetic centers of integer spin by nuclear forward scattering of synchrotron radiation, 2001, Proceedings of SPIE, v.4065, pp. 389-393.

27. Е.А. Попов, Гамма-эхо в ядерном резонансном рассеянии синхротронного излучения, 2002, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, №8, стр. 26-30.

28. Е.А. Попов, Е.А. Январёв, Изучение парамагнитной релаксации в белковых комплексах с помощью ядерного резонансного рассеяния синхротронного излучения, 2002, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, №8, стр. 22-25.

29. Е.А. Popov, Amplification of gamma radiation without inversion in the scheme with bichromatic radiofrequency field, 2003, Hyperfine Interactions (in press).

30. Е.А. Popov, V.V. Samartsev, Sh.Sh. Bashkirov, Е.А. Yanvarev, S.M. Kutsenko, and N.V. Polyakov, Nuclear resonant scattering of synchrotron radiation in gamma optical paramagnetic integer-spin media, 2004, Laser Physics, v.1, pp.1-5.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Moessbauer spectroscopy. Applications to physics, chemistry and biology. Ed. by B.V. Thosar, P.K. Iyengar, J.K. Srivastava and S.C. Bhargava Elsevier scientific publishing company Amsterdam – Oxford – New York, 1983, Ch.14.

2. Г.В. Смирнов, Ю.В. Швыдько, О.С. Колотов, В.А. Погожев, М. Котрбова, С. Кадечкова, Й. Новак, Наносекундная модуляция мессбауэровского излучения ^{57}Fe , ЖЭТФ, 1984, т.86, №4, стр.1495-1504.

3. P. Helisto, I. Tittonen, M. Lippmaa, T. Katila, Gamma echo, Phys. Rev. Lett., 1991, v.66, no.15, pp.2037-2040.
4. G.V. Smirnov, U van Burck, J. Arthur, S.L. Popov, A.Q.R. Baron, A.I. Chumakov, S.L. Ruby, W. Potzel, G.S. Brown, Nuclear exciton echo produced by ultrasound in forward scattering of synchrotron radiation, Phys. Rev. Lett., 1996, v.77, no.1, pp.183-186.
5. R. Coussement, M. van den Bergh, G. S'heeren, G. Neyens, R. Nowen, and P. Boolchand, Nonreciprocity of gamma emission and absorption due to quantum coherence at nuclear-level crossing, Phys. Rev. Lett., 1993, v. 71, no. 12, pp. 1824-1827.
6. E. Matthias, Angular correlation and Moessbauer-NMR double resonance, Hyperfine structure and nuclear radiation, Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1968, pp. 815-842.
7. G.V. Smirnov, U. van Buerck, A.I. Chumakov, A.Q.R. Baron, Synchrotron Moessbauer Source Phys. Rev. B, 1997, v.55, no.9, pp.5811-5813.
8. Yu. Kagan, A.M. Afanas'ev and V.G.Kohn, On excitation of isomeric nuclear states in a crystal by synchrotron radiation, J. Phys. C, 1979, v.12, pp.615-631.
9. G.T. Trammell and J.P. Hannon, Quantum beats from nuclei excited by synchrotron pulses, Phys. Rev. B, 1978, v.18, no.1, pp.165-172.
10. Х.Г. Богданова, В.А. Голенищев-Кутузов, М.И. Куркин, Л.И. Медведев, И.Р.Низамеев, А.П. Танкеев, Магнито-акустический канал для спин-ядерного возбуждения в $FeVO_3$, ЖЭТФ, 1993, т.103, стр. 163-171.